

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19674003

研究課題名（和文） 超高压地球科学：最下部マントル・中心核の物質学

研究課題名（英文） Ultrahigh-Pressure Earth Science:  
Study of Lowermost mantle and core materials

研究代表者

廣瀬 敬（HIROSE KEI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50270921

研究成果の概要（和文）：

地球中心に相当する超高压・超高温を静的に発生することに世界で初めて成功した。また、高压高温下において電気伝導度・熱伝導率・元素分配を測定する新たな技術の開発に成功した。これらの実験技術を用いて、下部マントル深部の電気伝導度・熱伝導率・鉄の分配、コアの高压高温下における鉄と酸化第一鉄の状態図などを決定し、下部マントル深部におけるマグマと固相の密度逆転、数十年周期で観察される一日の長さの変化の成因、外核中の成層構造、内核物質の結晶構造などを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

We first succeeded in generating static ultrahigh-pressure and -temperature conditions. We also developed new experimental methods to determine electrical and thermal conductivity and element partitioning at high pressure and temperature. With such techniques, we determined properties of the deep lower mantle and the phase relations in Fe and FeO at core pressures and temperatures. These results clarified the density crossover between melt and solid in the deep mantle, the cause of change in length of a day in decadal timescales, possible stratification in the outer core, and the crystal structure of inner core material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	48,500,000	14,550,000	63,050,000
2008年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2009年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2010年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2011年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
総計	88,100,000	26,430,000	114,530,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：マントル、核、ポストペロフスカイト、超高压

## 1. 研究開始当初の背景

地球の内部は深くなるにつれ、圧力と温度が高くなっていく高压高温の世界である。地球の中心は364GPa・>5000K、核・マントル境界は135GPa・2500-4000Kといった超高压高温

状態にあるとされる。そのような極限状態を実験室で実現することはきわめて難しいとされていた。そのため地球深部の物質学的な理解は未だ乏しかった。

そこで本研究では、レーザー加熱式ダイヤ

モンドセル(DAC)装置を用いた超高压・高温実験を行い、放射光を用いたX線回折測定と電子顕微鏡を用いた化学組成分析を行うことにより、マントル最下部から内核に至る地球深部の物質の化学組成と、構造、密度、電気伝導度その他の物性を明らかにすることを目的とした。さらに、地球内部の大きな境界領域である、核・マントル境界、および内核・外核境界における化学反応や結晶化作用、さらにはダイナミクス の 解 明 を 目 指 す も の と した。また本研究では現状の超高压高温発生技術をもう一步進め、まずは内核(>330GPa)、さらには世界初の地球中心の圧力温度条件の実験を目指すこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では以下の8つの目的で実験を行った。

- (1) スラブ物質の状態図の決定と最下部マントルの化学的不均質の解明
- (2) 超高温におけるポストペロフスカイト転移圧力の決定
- (3) 最下部マントルの電気伝導度測定
- (4) 核・マントル物質の化学反応と外核の化学組成の推定
- (5) 鉄合金の密度と外核の軽元素の推定
- (6) 内核圧力における超高温実験に向けた技術開発
- (7) 内核・外核境界における結晶化と内核の化学組成の推定
- (8) 内核物質の結晶構造と内核の異方性

## 3. 研究の方法

上記の目的(1)(2)(5)(8)については、超高压高温下におけるX線回折測定を大型放射光施設 SPring-8 にて行った。目的(3)についてはレーザー加熱式DACを使った高压高温下での測定技術の開発から始めることとした。(4)(7)については、放射光X線回折測定と回収試料の化学分析を行った。(6)については超高压発生用のアンピルのデザイン開発と断熱材の選択を進めた。

## 4. 研究成果

(1) マントル物質ならびに玄武岩質地殻物質の状態図を100-120GPaの圧力範囲で決定し、ポストペロフスカイト相転移やシリカ鉱物の相転移が起こる圧力を精密に求めた。その結果、玄武岩質地殻物質中では、典型的なマントル物質中よりも低い圧力でポストペロフスカイト相への転移が起こることが確認された。その結果を用いて、太平洋下の最下部マントルで得られた横波の速度構造を解釈し、マントルの底には玄武岩質海洋地殻が大量に溜まっていることを示した。すなわち、ブルーム発生領域の最下部マントルには、マントル物質と玄武岩質地殻物質が混合し

たパイルが存在することを意味する。これは従来の数値シミュレーション結果を裏付ける最初の証拠である。

このように、太平洋とアフリカの下に観測される横波の大きな速度異常の成因をあきらかにできたことは、マントルブルームの発生要因を探る上で、きわめて大きな意味を持つ。マントルブルームの熱異常は、玄武岩質物質に多量に含まれる放射性元素による発熱に由来する可能性が高い。本研究は、マントル最下部の化学組成異常と高温ブルームの成因に関して大きな貢献を果たした。これらの成果はEPSL誌に発表された。

(2) スプリングエイトにおけるX線回折実験の結果、 $MgSiO_3$  端成分におけるポストペロフスカイト相転移境界を、170GPa・4400Kまでの超高压高温下で精密に決定することに成功した。その結果、境界のクラペイロン勾配は約13MPa/Kと、他の重要なマントル鉱物の相転移境界のそれらに比べ、4倍以上大きな数字となった。このことは、ポストペロフスカイト相転移はマントルの対流を促進する重要な役割を持つことを意味する。またコア・マントル境界圧力における転移温度は約3500ケルビンであり、地震波不連続面の解析結果と総合すると、コア・マントル境界の温度は3700ケルビン程度と、従来の見積りよりやや低い温度であることが初めてあきらかとなった。さらに、地震学的観測で得られている対の不連続面の深さからマントル最下部の温度構造を見積もることに成功した。また適当な熱伝導率を仮定すると、コアからの熱流量は約7テラワット程度であることがわかった。このように本研究は、コア・マントル境界域の温度構造ならびに熱流量の推定に関して大きな貢献を果たした。これらの成果もEPSL誌に発表された。

(3) ペロフスカイト相、ポストペロフスカイト相、フェロペリクレースの3つの下部マントル鉱物、さらにはマントル物質パイライトの測定を行った。従来、下部マントルの伝導度はほぼ一定とされてきたが、鉄のスピ状態の変化とポストペロフスカイト相転移によって、大きく変動することが初めてあきらかとなった。特にポストペロフスカイト相への転移によって電気伝導度が3桁上昇し、最下部マントルは高電気伝導層であることがわかった。それゆえマントルの最下部と液体の外核との間に強い電磁氣的結合が生まれ、その結果マントルの自転速度にも影響を与えていることが示された。このように本研究は、下部マントルの電気伝導度のモデリングに関して大きな貢献を果たした。これらの成果はScience誌やEPSL誌に発表された一連の論文で報告されている。

(4) 最下部マントル鉱物と熔融鉄との間の平衡実験を行い、共存する両者の化学組成を決定し、そのような熔融鉄中にはシリコンと酸素が大量に溶け込むことをあきらかにした。このことは、シリコンと酸素が外核中に含まれていることを強く示唆している。またさらに、それらの溶解度は、観測から制約される実際の溶解量よりもはるかに多いことから、外核最上部には外核本体と組成の異なる低密度レイヤーが存在することを示唆している。従来、外核最上部の成層構造は地震学的に示唆されてきた。今回の結果は、その観測を裏付ける、初めての具体的な実験結果である。このように本研究は、コア・マントル間の化学反応や外核最上部の密度成層構造に関して大きな貢献を果たした。これらの成果は GRL 誌と PCM 誌に発表された論文で報告されている。

(5) 酸化鉄、鉄-シリコン合金、鉄-硫黄化合物、鉄-炭素化合物の4つにつき、圧力-密度曲線を 270GPa に至る超高压まで決定することができた。その結果、酸素もしくは炭素が熔融鉄中に大量に含まれると、熔融鉄の圧縮率観測される外核の圧縮率よりもかなり大きくなってしまうこと、逆に鉄-シリコン合金と鉄-硫黄化合物の圧縮率は観測結果と整合的なことが示された。この成果は JGR 誌に公表された。

(6) 超高压超高温の発生に向け、技術開発を極めて精力的に行った。その結果、研究開始時には 320GPa・2000K であった発生限界を、ついに 364GPa・6000K という、まさに地球中心に相当する条件の発生に成功した。当初の目標であった、364GPa・4000K という数字を、温度の面で大きく上回った。これにより、ついに中心核の圧力温度での実験が可能になった。これはもちろん世界初の快挙であり、衝撃圧縮実験のような動的な実験を除き、超高压超高温発生の世界最高記録である。

(7) Fe-FeSi 系における融解実験を行い、リキダス温度以上までの状態図を 20GPa と 100GPa で決定した。その結果、共融点の位置は圧力の影響をあまり受けないこと、共存する固相・液相の化学組成の差はほとんどなく、これも圧力の効果がほとんど見られないことがわかった。シリコンが外核の主要な軽元素である場合、内核境界における組成差がほとんどつかないと考えられる。すなわちシリコンのみが外核の主な軽元素ではないことがわかった。

(8) スプリングエイトにおける X線回折実験により、内核の超高压・超高温下における

純鉄と FeO の状態図を決定した。その結果、内核物質の結晶構造は hcp 構造であること、FeO は外核中位の圧力下で NaCl 型相から CsCl 型相へ相転移を起こすことがわかった。後者について、同様の構造変化は酸素を含む外核中でも期待されることから、外核には成層構造がある可能性を指摘した。これらは Science 誌に 2 本の論文として公表された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

①Murakami, M., Ohishi, Y., Hirao, N., Hirose, K., A perovskitic lower mantle inferred from high-pressure, high-temperature sound velocity data, *Nature*, 査読有, doi:10.1038/nature11004, 2012.

②Nomura, R., Ozawa, H., Tateno, S., Hirose, K., Herlund, J., Muto, S., Ishii, H., Hiraoka, N., Spin crossover and iron-rich silicate melt in the Earth's deep mantle, *Nature*, 査読有, 473, 199-202, 2011.

③Ozawa, H., Takahashi, F., Hirose, K., Ohishi, Y., Hirao, N., Phase transition in FeO and stratification in Earth's outer core, *Science*, 査読有, 334, 792-794, 2011.

④Sata, N., Hirose, K., Shen, G., Ohishi, Y., Hirao, N., Compression of FeSi, Fe<sub>3</sub>C, FeO.950, and FeS under the core pressures and implication for light element in the Earth's core, *Journal of Geophysical Research*, 査読有, 115, 2, B09204, doi:10.1029/2009JB006975, 2010.

⑤Tateno, S., Hirose, K., Ohishi, Y., Tatsumi, Y., The structure of iron in Earth's inner core, *Science*, 査読有, 330, 359-361, 2010.

⑥Tateno, S., Hirose, K., Sata, N., Ohishi, Y., Determination of post-perovskite phase transition boundary in MgSiO<sub>3</sub> up to 4400 K and implications for thermal structure at the base of the mantle, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 277, 130-136, 2009.

⑦Ohta, K., Onoda, S., Hirose, K., Sinmyo, R., Shimizu, K., Sata, N., Ohishi, Y., Yasuhara, A., The electrical conductivity of post-perovskite in Earth's D'' layer, *Science*, 査読有, 320, 89-91, 2008.

⑧Kuwayama, Y., Hirose, K., Sata, N., Ohishi, Y., Phase relations of iron and iron-nickel alloys up to 300 GPa; Implications for the composition and the structure of the Earth's inner core, *Earth and Planetary Science Letters*, 査読有, 273, 379-385, 2008.

[学会発表] (計5件)

①Hirose, K., Discovery of post-perovskite and its geophysical implications (Keynote talk), International Union of Crystallography-22nd Congress, 2011. 8. 24, マドリード.

②Hirose, K., Perovskite and Post-perovskite in the Earth's Deep Mantle, International Mineralogical Assembly, 2010, 8, 27, ブダペスト

③Hirose, K. "High - pressure studies of core materials" Gordon Conference, 2009. 6. 18. ボストン.

④Hirose, K. "Partitioning of iron in the lower mantle" Fall Meeting, American Geophysical Union, December 2007. 12. 12, サンフランシスコ.

⑤Hirose, K. "Discovery of post-perovskite and the new views of core-mantle boundary region" International Union of Geodesy and Geophysics 2007, 2007. 7. 6, ペルージャ.

[その他]

ホームページ等

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/hirose/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 敬 (HIROSE KEI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：50270921

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：